

Δομές MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

Τα τρανζίστορ MOSFET είναι διατάξεις ελεγχόμενες από τάση οι οποίες δεν απαιτούν μεγάλα ρεύματα οδήγησης όπως οι αντίστοιχες διπολικές διατάξεις. Πρόκειται για τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET) που λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο με τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου επαφής (JFET). Η βασική τους διαφορά έναντι των JFET είναι ότι το δυναμικό που ελέγχει τη λειτουργία τους (δυναμικό πύλης) εφαρμόζεται στην ενεργό περιοχή (κανάλι) διαμέσου ενός μονωτικού στρώματος από κατάλληλο οξείδιο αντί να εφαρμόζεται μέσω μιας p-n επαφής.

Τα MOSFET μπορούν να κατασκευαστούν τόσο μεμονωμένα (διακριτά τρανζίστορ) όσο και ως μέρη ενός ευρύτερου ολοκληρωμένου κυκλώματος. Η ενεργή περιοχή τους μπορεί να είναι ένα κανάλι p-τύπου οπότε το τρανζίστορ χαρακτηρίζεται και ως PMOS ή ένα κανάλι n-τύπου οπότε το τρανζίστορ χαρακτηρίζεται και ως NMOS. Το μεγάλο πλεονέκτημα των δομών MOSFET είναι η πολύ μικρή ισχύς τους λόγω του μονωτικού στρώματος που παρεμβάλλεται μεταξύ πύλης και καναλιού.

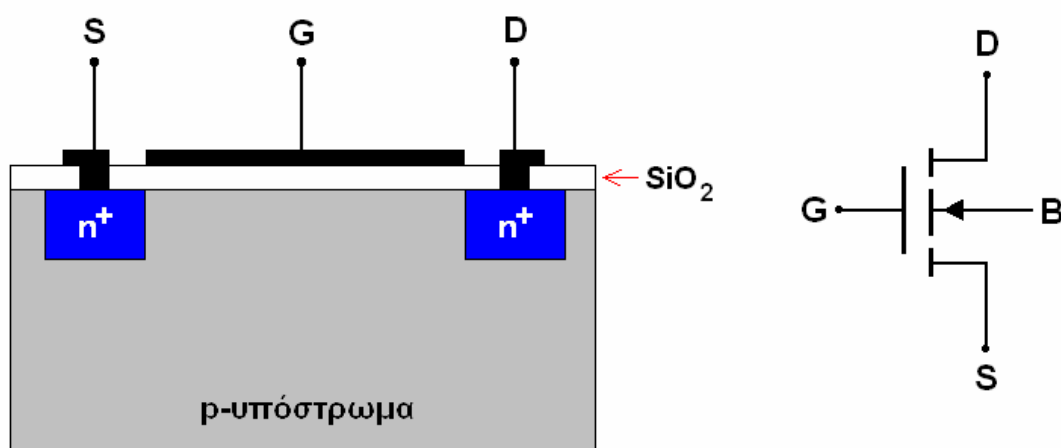
Λόγω αυτής της μόνωσης τα τρανζίστορ αυτά χαρακτηρίζονται και ως "Insulated Gate Field Effect Transistors" (IGFET) μια ονομασία πιο γενική με δεδομένο ότι οι πύλες δεν είναι πάντα μεταλλικές.

Αρχικά οι δομές MOSFET χρησιμοποιούσαν μεταλλική πύλη, κανάλι πυριτίου και διοξείδιο του πυριτίου ως μονωτικό στρώμα. Στη συνέχεια, οι μεταλλικές πύλες αντικαταστάθηκαν από πύλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου (γενιά κόμβων πύλης των 65nm) και οι πιο εξελιγμένες τεχνολογίες έκαναν χρήση οξυνιτριδίου του πυριτίου ως μονωτικού υλικού αντί του διοξειδίου του πυριτίου.

Οι μεταλλικές πύλες επανέρχονται στο προσκήνιο σε συνδυασμό με τη χρήση διηλεκτρικών υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς ως μονωτικών πύλης, στις τεχνολογίες πύλης των 45nm και κάτω.

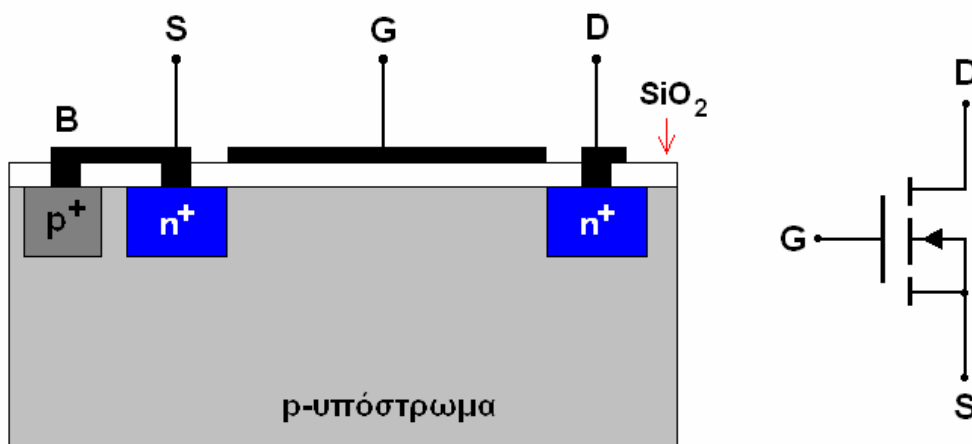
Αναφορικά τώρα με τον ημιαγωγό που χρησιμοποιείται, αυτός είναι κυρίως το πυρίτιο ενώ κατασκευαστές όπως η IBM χρησιμοποιούν και το SiGe. Ημιαγωγοί με υψηλές επιδόσεις, λόγω αυξημένης ευκινησίας φορέων σε σχέση με το πυρίτιο, όπως το GaAs δεν είναι κατάλληλοι για την κατασκευή MOS τρανζίστορ λόγω της αδυναμίας ανάπτυξης του αντίστοιχου οξειδίου του ημιαγωγού.

Η κεντρική ιδέα της λειτουργίας των MOSFET είναι η ακόλουθη: Η εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο διαπερνά το διηλεκτρικό της πύλης και δημιουργεί (MOSFET προσαύξησης) ή τροποποιεί (MOSFET διακένωσης) ένα στρώμα αναστροφής. Το στρώμα αναστροφής έχει αντίθετο τύπο αγωγιμότητας από αυτόν του υποβάθρου και ταυτόσημο με αυτόν των διαχύσεων σε πηγή και απαγωγό .



Σχήμα 1. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS) με το σύμβολό του.

Για παράδειγμα σε μια δομή όπως αυτή του σχήματος 1 όπου η πηγή (S) και ο απαγωγός (D) είναι n-τύπου και το υπόστρωμα p-τύπου, το κανάλι αναστροφής που θα σχηματιστεί μεταξύ πηγής και απαγωγού με την εφαρμογή κατάλληλης διαφοράς δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής θα είναι n-τύπου. Δημιουργείται έτσι ένας διάυλος που επιτρέπει τη ροή του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού. Η μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ της πύλης και του σώματος του υποστρώματος (που συνήθως το υπόστρωμα βραχυκυκλώνεται με την πηγή όπως φαίνεται στο σχήμα 2) διαμορφώνει την αγωγιμότητα του καναλιού ελέγχοντας έτσι τη ροή του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού.

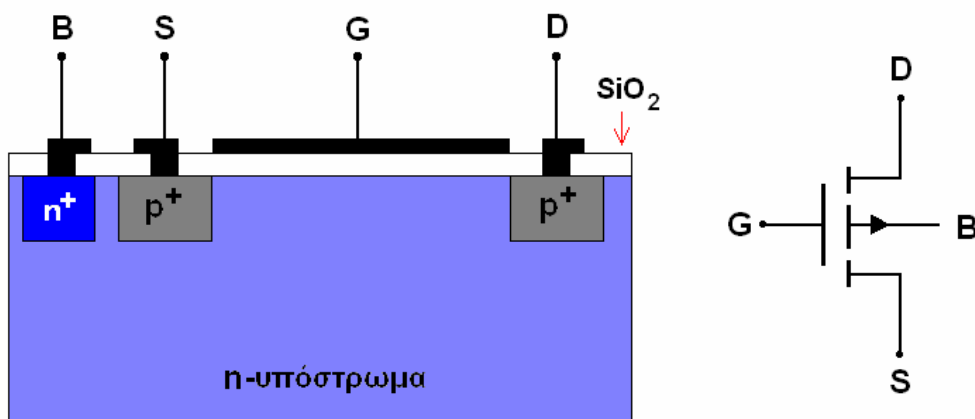


Σχήμα 2. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS) με βραχυκύκλωμα μεταξύ της πηγής και του σώματος του υποστρώματος (Bulk) μαζί με το σύμβολό του.

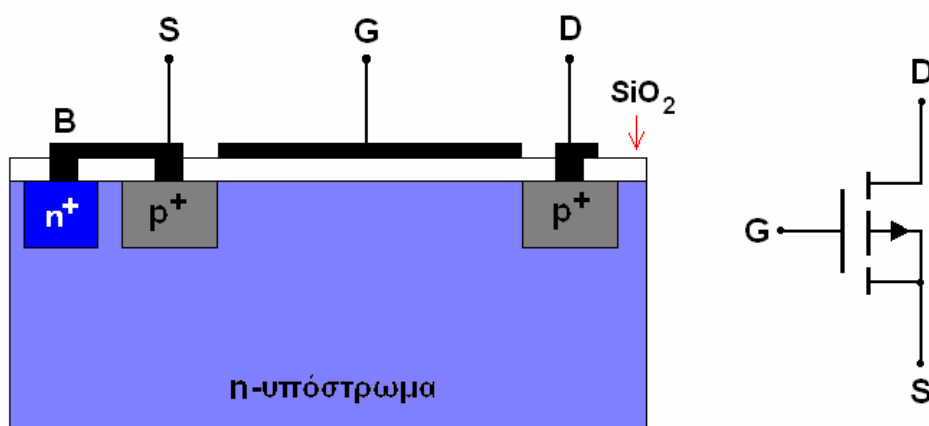
A. MOSFET προσαύξησης (enhancement MOSFET).

A1. Βασικά χαρακτηριστικά.

Οι δομές που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 1 και 2 είναι κατάλληλες για τη λειτουργία ενός MOSFET ως MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Αντίστοιχα οι δομές των σχημάτων 3 και 4 είναι κατάλληλες για λειτουργία ως MOSFET προσαύξησης p-καναλιού (enhancement PMOS).



Σχήμα 3. MOSFET προσαύξησης p-καναλιού (enhancement PMOS) με το σύμβολό του.



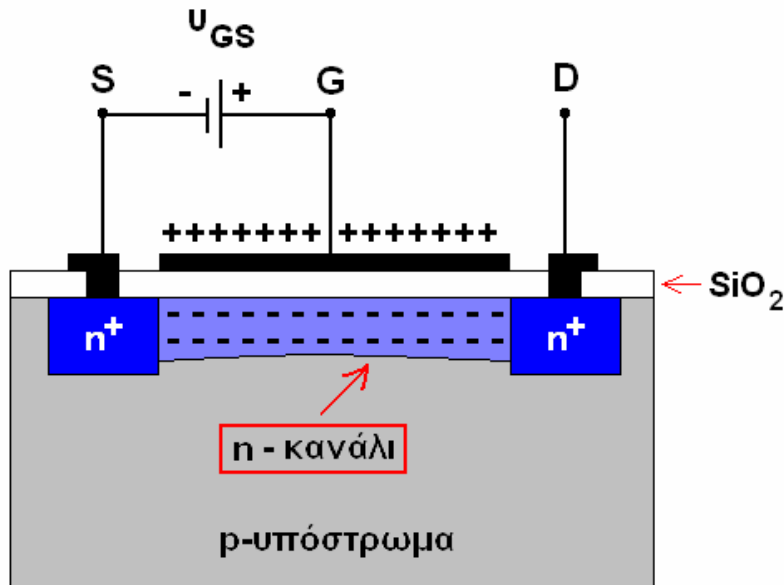
Σχήμα 4. MOSFET προσαύξησης p-καναλιού (enhancement PMOS) με βραχυκύκλωμα μεταξύ της πηγής και του σώματος του υποστρώματος (Bulk) μαζί με το σύμβολό του.

Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας ενός καναλιού αναστροφής (κανάλι n-τύπου) μέσα σε ένα υπόστρωμα p-τύπου, δημιουργώντας έτσι έναν n-δίαυλο που ενώνει τις n⁺-τύπου περιοχές της πηγής και του απαγωγού.

Όταν στην πύλη δεν εφαρμόζεται κάποιο δυναμικό δεν υπάρχει ο n-δίαυλος και οι n⁺-τύπου περιοχές του απαγωγού και της πηγής χωρίζονται από το p-τύπου υλικό του υποστρώματος που είναι πολύ μικρής αγωγιμότητας. Το p-τύπου υπόστρωμα το μονωτικό οξειδίο και η μεταλλική πύλη αποτελούν έναν πυκνωτή. Όταν η μεταλλική πύλη βρεθεί σε θετικό δυναμικό υψηλότερο από αυτό της πηγής ($v_{GS} > 0$ στο σχήμα 5) συσσωρεύονται σε αυτήν θετικά φορτία τα οποία έλκουν ηλεκτρόνια (φορείς μειονότητας) από το p-υπόστρωμα προς τη διεπιφάνεια με το οξειδίο απωθώντας παράλληλα τις οπές. Όταν η συσσώρευση αυτών των αρνητικών φορτίων φτάσει σε συγκέντρωση τέτοια ώστε να ξεπερνά τη συγκέντρωση των φορέων πλειονότητας (οπών) του p-υποστρώματος επέρχεται η αναστροφή του τύπου αγωγιμότητας και σχηματίζεται ένας ομοιογενής δίαυλος τύπου n στο p-υπόστρωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.

Για να μπορέσει η συγκέντρωση ηλεκτρονίων να ξεπεράσει τοπικά - κοντά στο μονωτικό στρώμα και κατά μήκος ολόκληρης της έκτασης της πύλης- αυτήν των οπών χρειάζεται η τάση v_{GS} να ξεπεράσει κάποια τιμή κατώφλιου V_T (Threshold Voltage) που είναι της τάξης των 1-4V. Το κατώφλι αυτό είναι αντίστοιχο σε ρόλο με το δυναμικό pinch off, V_P , που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο των JFET.

Ο σχηματισμός του διαύλου ουσιαστικά ισοδυναμεί με τη δημιουργία ενός καναλιού υψηλής αγωγιμότητας μεταξύ πηγής και απαγωγού. Όσο το θετικό δυναμικό της πύλης αυξάνει τόσο αυξάνεται και η αγωγιμότητα του διαύλου.

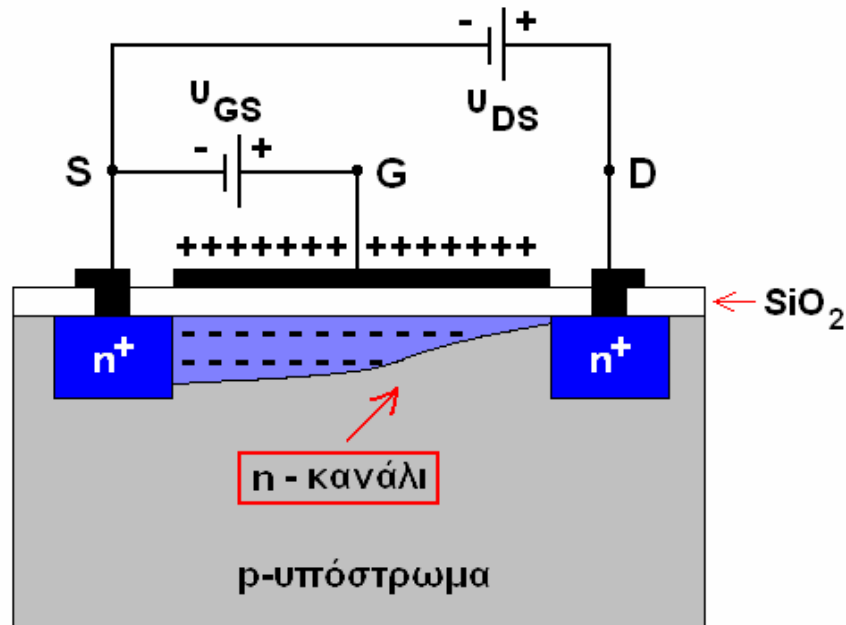


Σχήμα 5. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Δημιουργία του n-καναλιού όταν η θετική τάση U_{GS} ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου V_T .

Αν στη συνέχεια ο απαγωγός έρθει σε θετικό δυναμικό σε σχέση με την πηγή θα παρουσιαστεί ροή ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού ενώ παράλληλα λόγω της πτώσης τάσης που προκαλεί το ρεύμα κατά μήκος της αντίστασης του διαύλου το σχήμα του διαύλου θα τροποποιηθεί παρουσιάζοντας μια συρρίκνωση προς την περιοχή του απαγωγού (σχήμα 6).

Αν με τη μεταβλητή x συμβολίσουμε την απόσταση ενός σημείου του διαύλου από την πηγή τότε το δυναμικό του σημείου αυτού με αναφορά το δυναμικό της πηγής θα είναι U_{XS} . Το δυναμικό U_{XS} των σημείων του διαύλου αυξάνεται καθώς κινούμαστε από την πηγή προς τον απαγωγό.

Για να συντηρείται δίαυλος σε κάποια θέση x μεταξύ πηγής και απαγωγού θα πρέπει η διαφορά δυναμικού U_{GX} να είναι τουλάχιστον ίση ή να ξεπερνά το δυναμικό κατωφλίου V_T .



Σχήμα 6. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Τροποποίηση της μορφής του καναλιού υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού u_{DS} μεταξύ απαγωγού και πηγής.

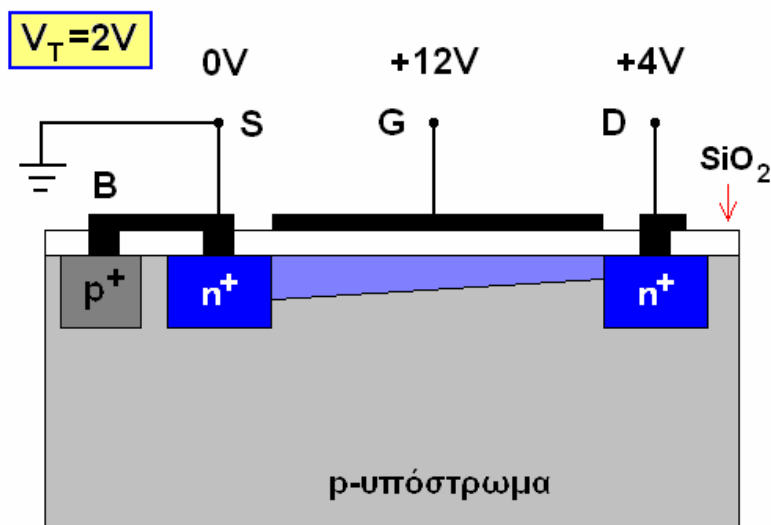
Ένα χρήσιμο μέγεθος που δείχνει το κατά πόσο σε κάποιο σημείο x μεταξύ πηγής και απαγωγού συντηρείται η αναστροφή τύπου αγωγιμότητας, υπάρχει δηλαδή ο διάυλος, είναι το δυναμικό διατήρησης διαύλου, $V_{\delta\delta}$:

$$V_{\delta\delta} = u_{GX} - V_T \quad (1)$$

Στα σημεία όπου το δυναμικό αυτό είναι θετικό ο n-διάυλος συντηρείται στα σημεία όπου αλλάζει πρόσημο και γίνεται αρνητικό ο διάυλος παύει να υφίσταται. Όταν ο διάυλος διατηρείται σε όλο του το μήκος από την πηγή στον απαγωγό η αγωγιμότητα του MOSFET χαρακτηρίζεται ως μη κορεσμένη. Το ρεύμα i_D , που ρέει στην περίπτωση αυτή μεταξύ πηγής και απαγωγού εξαρτάται τόσο από το u_{DS} όσο και από το u_{GS} , και αυξάνει

με την αύξησή τους. Όταν ο διάυλος κλείνει από κάποιο σημείο του μέχρι τον απαγωγό η αγωγιμότητα χαρακτηρίζεται ως κορεσμένη και το ρεύμα που ρέει μεταξύ πηγής και απαγωγού είναι ανεξάρτητο της διαφοράς δυναμικού v_{DS} στους δύο αυτούς ακροδέκτες και εξαρτάται μόνο από το v_{GS} . Όταν ο διάυλος δεν σχηματίζεται καθόλου ($v_{GS} < V_T$) τότε το τρανζίστορ βρίσκεται σε αποκοπή και το ρεύμα μηδενίζεται.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1. Μη κορεσμένη αγωγιμότητα.



Σχήμα 7. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Κατάσταση μη-κορεσμένης αγωγιμότητας (non-saturated conduction).

Στη διάταξη του σχήματος 7 μπορεί εύκολα να αποδειχθεί με τη βοήθεια της έννοιας του **δυναμικού διατήρησης διαύλου** ότι ο διάυλος δεν κλείνει σε κανένα σημείο μεταξύ πηγής και απαγωγού και κατά συνέπεια η αγωγιμότητά του χαρακτηρίζεται ως μη κορεσμένη.

Η εξίσωση 1 για μεγαλύτερη ευκολία μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$V_{\delta\delta} = v_{GX} - V_T = v_{GS} - v_{XS} - V_T \quad (2)$$

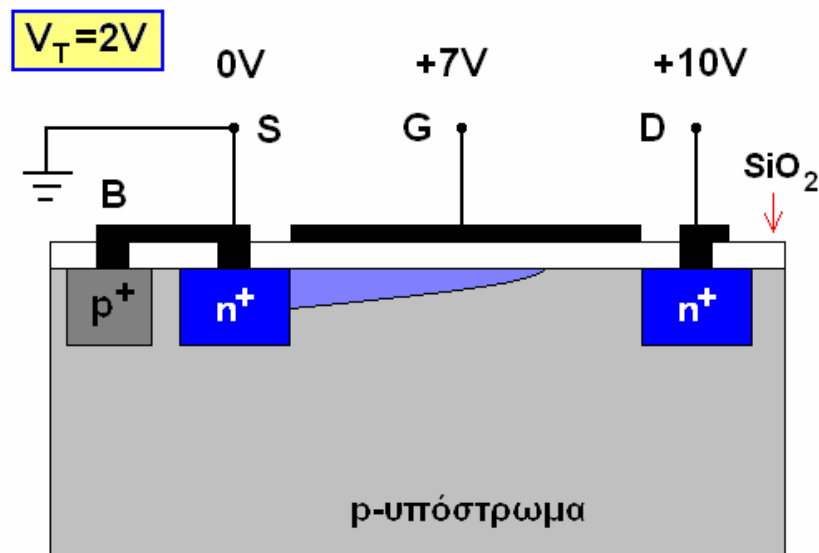
Η εφαρμογή της εξίσωσης 2 για τα δύο άκρα του εν δυνάμει διαύλου δίνει τα εξής αποτελέσματα:

$$\text{ΑΚΡΟ ΠΗΓΗΣ} \rightarrow V_{\delta\delta} = v_{GX} - V_T = v_{GS} - v_{XS} - V_T = 12 - 0 - 2 = 10V$$

$$\text{ΑΚΡΟ ΑΠΑΓΩΓΟΥ} \rightarrow V_{\delta\delta} = v_{GX} - V_T = v_{GS} - v_{XS} - V_T = v_{GS} - v_{DS} - V_T = 12 - 4 - 2 = 6V$$

Παρατηρούμε ότι και στα δύο άκρα το δυναμικό διατήρησης είναι θετικό οπότε ο δίαυλος υφίσταται σε ολόκληρη τη διαθέσιμη του έκταση (από την πηγή ως τον απαγωγό).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2. Κορεσμένη αγωγιμότητα.



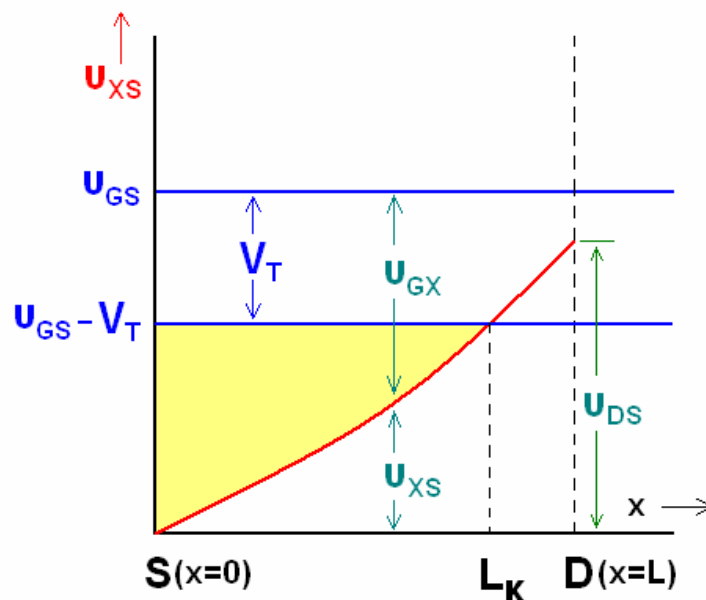
Σχήμα 8. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Κατάσταση κορεσμένης αγωγιμότητας (saturated conduction).

Η εφαρμογή της εξίσωσης 2 για τα δύο άκρα του εν δυνάμει διαύλου της διάταξης του σχήματος 8 δίνει τα εξής αποτελέσματα:

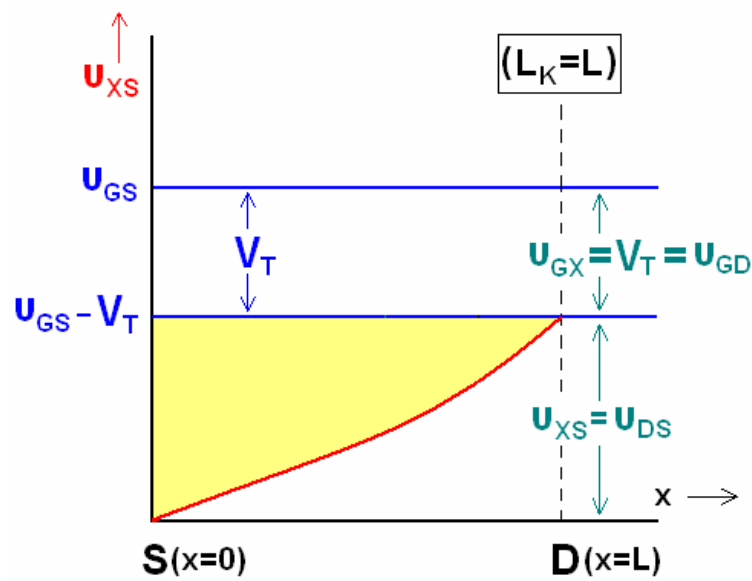
$$\text{ΑΚΡΟ ΠΗΓΗΣ} \rightarrow V_{\delta\delta} = v_{GX} - V_T = v_{GS} - v_{XS} - V_T = 7 - 0 - 2 = 5V$$

$$\text{ΑΚΡΟ ΑΠΑΓΩΓΟΥ} \rightarrow V_{\delta\delta} = v_{GX} - V_T = v_{GS} - v_{XS} - V_T = v_{GS} - v_{DS} - V_T = 7 - 10 - 2 = -5V$$

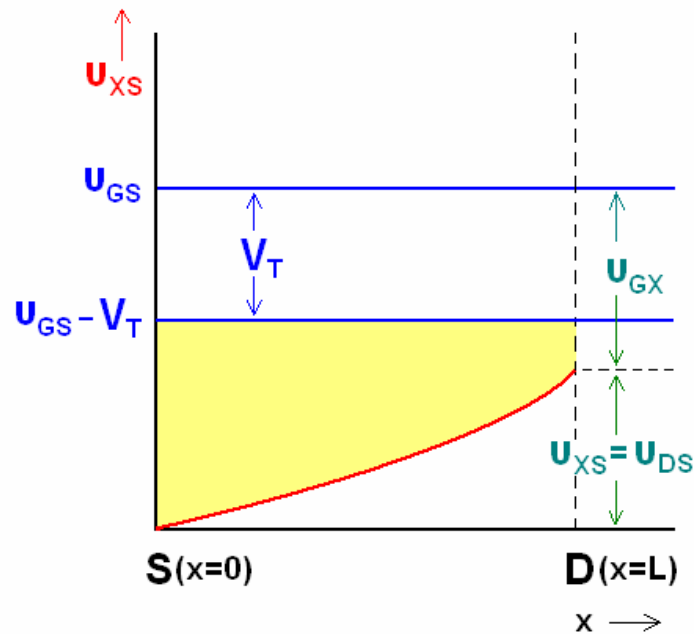
Παρατηρούμε ότι στο άκρο της πηγής ο διάυλος υφίσταται αφού εκεί είναι $V_{\delta\delta} = 5V > 0$. Αντίθετα στο άκρο του απαγωγού ο διάυλος δε διατηρείται αφού $V_{\delta\delta} = -5V < 0$. Επειδή μάλιστα στον απαγωγό η τιμή του συγκεκριμένου δείκτη, δηλαδή του δυναμικού διατήρησης, είναι αρκετά χαμηλότερη της κρίσιμης τιμής των $0V$. Αναμένεται πως ο διάυλος θα κλείνει σε μια ενδιάμεση θέση μεταξύ πηγής και απαγωγού.



Σχήμα 9. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Το κανάλι κλείνει σε μια απόσταση L_K από την πηγή.



Σχήμα 10. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Το κανάλι κλείνει στον απαγωγό (pinch off).



Σχήμα 11. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Το κανάλι δεν κλείνει.

Για μεγαλύτερη εμπέδωση της όλης συμπεριφοράς του διαύλου, στα σχήματα 9-11 παρουσιάζεται σε μορφή διαγραμμάτων η γραφική παράσταση του δυναμικού του v_{XS} του εν δυνάμει διαύλου στα διάφορα σημεία του συναρτήσει της απόστασής τους x από την πηγή.

Με την κίτρινου χρώματος σκίαση καταδεικνύονται στα τρία διαγράμματα οι θέσεις του εν δυνάμει διαύλου για τις οποίες ο δίαυλος διατηρείται και ισχύει:

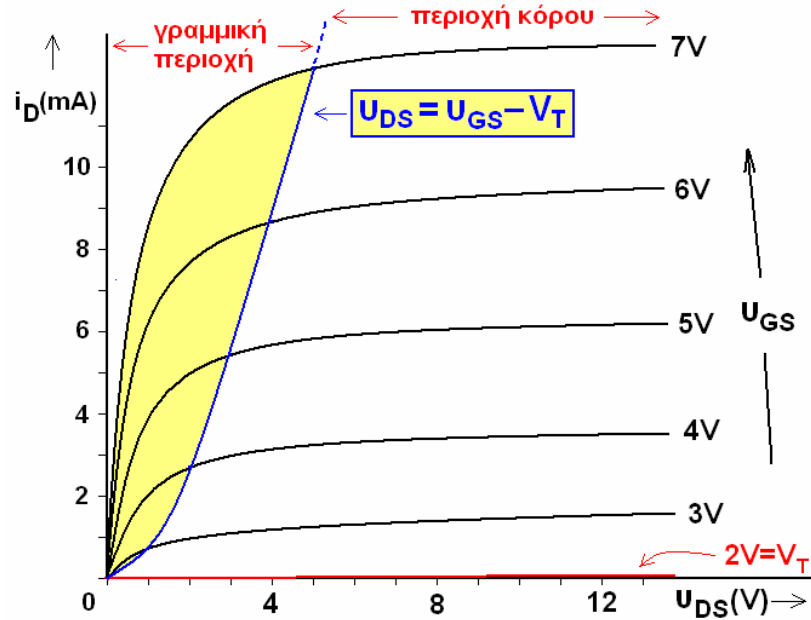
$$V_{\delta\delta} = v_{GX} - V_T > 0 \quad (3)$$

$$v_{XS} < v_{GS} - V_T \quad (4)$$

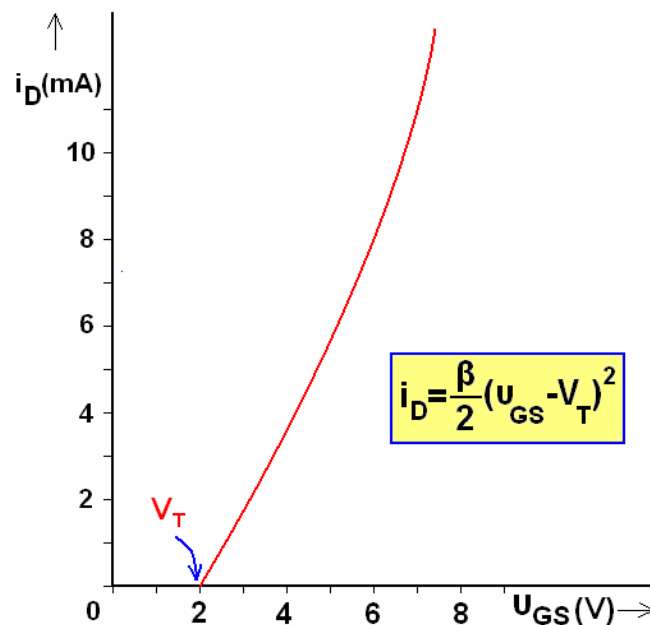
Η τελευταία ανισότητα ουσιαστικά εκφράζει τη σύγκριση μεταξύ της v_{XS} και του ορίου $v_{GS} - V_T$ το οποίο παρουσιάζεται και στα τρία σχήματα. Όταν η v_{XS} ξεπερνά αυτό το όριο ο δίαυλος κλείνει. Έτσι στο σχήμα 9 ο δίαυλος κλείνει σε μια απόσταση L_K μακριά από την πηγή πριν φτάσει στον απαγωγό, στο σχήμα 10 κλείνει ακριβώς πάνω στον απαγωγό ενώ στο σχήμα 11 δεν κλείνει καθόλου αφού η καμπύλη της v_{XS} δεν προλαβαίνει να τμήσει την ευθεία $v_{GS} - V_T$.

Από τη μελέτη των σχημάτων 9-11 προκύπτει επίσης ότι για σταθερή τιμή της v_{GS} , ο δίαυλος κλείνει ολοένα και πιο κοντά προς την πηγή όσο η τάση v_{DS} αυξάνει.

A2. Το ρεύμα στις τρεις καταστάσεις λειτουργίας του MOSFET προσαύξησης.



Σχήμα 12. Χαρακτηριστικές i_D - u_{DS} MOSFET προσαύξησης.



Σχήμα 13. Χαρακτηριστική μεταφοράς MOSFET προσαύξησης. Η χαρακτηριστική μεταφοράς υπολογίζεται για σταθερή τιμή της u_{DS} .

Στα σχήματα 12 και 13 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος του MOSFET προσαύξησης.

Ο γεωμετρικός τόπος που χωρίζει τη μη κορεσμένη αγωγιμότητα από την κορεσμένη στο σχήμα 12 αντιστοιχεί στα σημεία εκείνα για τα οποία κλείνει ο δίαυλος στον απαγωγό, και κατά συνέπεια ισχύει:

$$\begin{aligned} v_{GD} = V_T &\Rightarrow v_{GS} - v_{DS} = V_T \Rightarrow \\ \Rightarrow v_{DS} &= v_{GS} - V_T \end{aligned} \quad (5)$$

Γενικά για το ρεύμα στις τρεις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του MOSFET προσαύξησης n-καναλιού ισχύουν τα ακόλουθα:

1. **Περιοχή αποκοπής (cut-off ή sub-threshold περιοχή).** Στην περιοχή αυτή, που αντιστοιχεί σε $v_{GS} < V_T$, ο δίαυλος κλείνει στη θέση της πηγής (δε σχηματίζεται δηλαδή καθόλου δίαυλος) και το ρεύμα που ρέει μεταξύ πηγής και απαγωγού στην ιδανική περίπτωση είναι μηδέν. Στην πραγματικότητα όμως, λόγω του ότι οι ενέργειες των ηλεκτρονίων ακολουθούν την κατανομή Boltzmann υπάρχουν πάντα κάποια ενεργητικά ηλεκτρόνια στην πηγή που εισέρχονται στην p-περιοχή και φτάνουν στον απαγωγό δημιουργώντας ένα ρεύμα διαρροής (sub-threshold leakage) που είναι εκθετική συνάρτηση της τάσης v_{GS} .
2. **Περιοχή τριόδου ή γραμμικής λειτουργίας.** Οι συνθήκες για να βρεθεί το MOSFET σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας είναι: $v_{GS} > V_T$ και $v_{DS} < v_{GS} - V_T$. Το τρανζίστορ αρχίζει να λειτουργεί καθώς τώρα δημιουργείται ένα n-τύπου κανάλι που συνδέει πηγή και απαγωγό και επιτρέπει τη ροή ρεύματος μεταξύ των δύο αυτών

περιοχών. Στην περιοχή αυτή το MOSFET συμπεριφέρεται σαν μια αντίσταση ελεγχόμενη από τάση. Μια αντίσταση που ελέγχεται τόσο από την τάση v_{DS} όσο και από την τάση v_{GS} . Λόγω αυτής της εξάρτησης, το ρεύμα i_D που διαρρέει το κανάλι θα γράφεται σε συνάρτηση των τάσεων v_{DS} και v_{GS} :

$$\begin{aligned} i_D &= \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_T) v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right] = \\ &= \frac{\mu_n \varepsilon}{t_{ox}} \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_T) v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right] = \\ &= \beta \left[(v_{GS} - V_T) v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

όπου:

$\mu_n \rightarrow$ η ευκινησία των ελευθέρων φορέων,

$\varepsilon \rightarrow$ η ηλεκτρική διαπερατότητα του οξειδίου

$C_{OX} \rightarrow$ η χωρητικότητα της πύλης ανά μονάδα επιφάνειας,

$t_{OX} \rightarrow$ το πάχος του μονωτικού οξειδίου πύλης,

$W \rightarrow$ το εύρος του καναλιού (σχήμα 14),

$L \rightarrow$ το μήκος του καναλιού (σχήμα 14) και

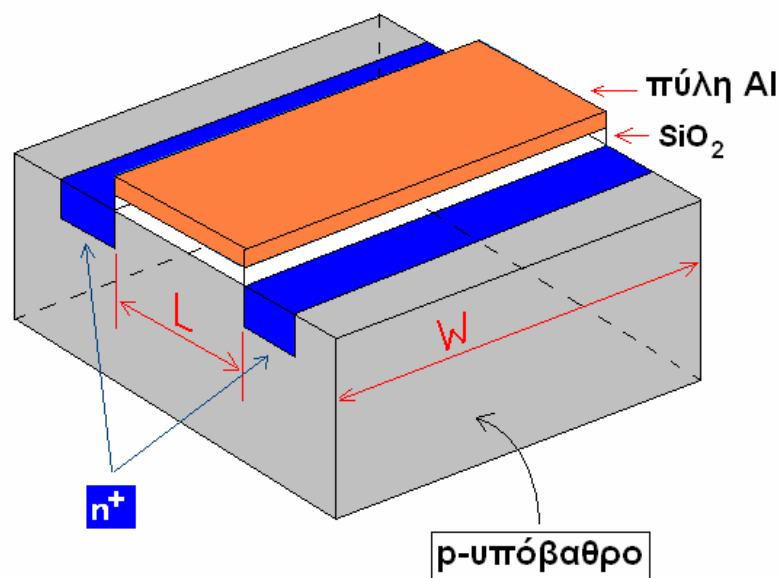
$\beta \rightarrow$ ο παράγοντας ενίσχυσης (gain factor) του MOS τρανζίστορ.

3. **Περιοχή κόρου (saturation).** Οι συνθήκες για να βρεθεί το MOSFET σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας είναι: $v_{GS} > V_T$ και $v_{DS} > v_{GS} - V_T$. Το κανάλι - όπως ήδη προαναφέρθηκε - είναι εν μέρει σχηματισμένο. Καλύπτει ένα συγκεκριμένο κλάσμα του συνολικού μήκους L του εν δυνάμει καναλιού, από την πηγή μέχρι ένα μήκος L_K , όπως φαίνεται και στο σχήμα.9, ενώ στο υπόλοιπο

τμήμα μέχρι τον απαγωγό είναι κλειστό. Το ρεύμα κάτω από αυτές τις συνθήκες μπορεί να θεωρηθεί σε πρώτη προσέγγιση αναξάρτητο της τάσης v_{DS} :

$$i_D = \frac{\mu_n C_{OX}}{2} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_T)^2 = \frac{\beta}{2} (v_{GS} - V_T)^2 \quad (7)$$

Οι εξισώσεις 6 και 7 ισχύουν και για PMOS τρανζίστορ με τη διαφορά ότι πρέπει ρεύματα και τάσεις έχουν αντίθετο πρόσημο και η ευκινησία των ηλεκτρονίων, μ_n , να αντικατασταθεί από την ευκινησία των οπών, μ_p .



Σχήμα 14. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ 1. Οριοθέτηση περιοχής κορεσμού.

Αν στις εξισώσεις 6 και 7 αντικαταστήσουμε το $v_{GS} - V_T$ με το v_{DS} (με βάση την εξίσωση 5) τότε θα προκύψει η χαρακτηριστική εξίσωση

του γεωμετρικού τόπου των σημείων του επιπέδου i_D - v_{DS} που χωρίζουν την κορεσμένη από τη μη-κορεσμένη αγωγιμότητα. Οι εξισώσεις 6 και 7 καταλήγουν στην ακόλουθη μορφή του γεωμετρικού τόπου – συνόρου:

$$i_D = \frac{\beta}{2} v_{GS}^2 \quad (8)$$

ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ 2. Διαμόρφωση μήκους καναλιού.

Παρατηρώντας τις χαρακτηριστικές του σχήματος 12, γίνεται φανερό πως η εξίσωση 7 ισχύει μόνο σε πρώτη προσέγγιση αφού οι χαρακτηριστικές στην περιοχή του κόρου δεν είναι οριζόντιες αλλά το ρεύμα i_D παρουσιάζει μια ασθενική αύξηση συναρτήσει της τάσης v_{DS} . Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη διαμόρφωση του μήκους του διαύλου κατά τη μεταβολή της τάσης v_{DS} και όταν λαμβάνεται υπόψη η εξίσωση 7 τροποποιείται στην :

$$i_D = \frac{\beta}{2} (v_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda v_{DS}) \quad (9)$$

όπου λ (το $1/\lambda$ ονομάζεται τάση Early) είναι ένας εμπειρικός παράγοντας διαμόρφωσης του μήκους του καναλιού (channel length modulation factor) που η τιμή του μεταβάλλεται στην περιοχή $0.02 - 0.04 \text{ V}^{-1}$.

ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ 3. Φαινόμενο σώματος (body effect).

Το φαινόμενο σώματος αναφέρεται στην εξάρτηση του δυναμικού κατωφλίου, V_T , από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της πηγής και του σώματος (bulk) του υποστρώματος¹. Στα σχήματα 2,4,7 και 8 η πηγή με τον ακροδέκτη του υποστρώματος παρουσιάζονται βραχυκυκλωμένες. Κάτω από αυτές τις συνθήκες το δυναμικό κατωφλίου χαρακτηρίζεται ως

¹ Το σώμα του υποστρώματος πολλές φορές χρησιμοποιείται ως δεύτερη πύλη και χαρακτηρίζεται τότε σαν πίσω πύλη (back gate).

V_{T0} . Αν μεταξύ της πηγής και του υποστρώματος η διαφορά δυναμικού πάρει μη μηδενική τιμή, $V_{SB} \neq 0$, τότε το δυναμικό κατωφλίου γράφεται σα συνάρτηση της V_{SB} ως:

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{V_{SB} + 2\phi_F} - \sqrt{2\phi_F} \right) \quad (10)$$

όπου:

$\gamma \rightarrow$ η παράμετρος του φαινομένου σώματος και

$\phi_F \rightarrow$ η παράμετρος επιφανειακού δυναμικού

Η παράμετρος γ γράφεται ως:

$$\gamma = \left(\frac{t_{OX}}{\epsilon_{OX}} \right) \sqrt{2q\epsilon_{Si}N_{SUB}} \quad (11)$$

όπου:

$q \rightarrow$ το φορτίο του ηλεκτρονίου,

$t_{OX} \rightarrow$ το πάχος του μονωτικού οξειδίου πύλης,

$\epsilon_{OX} \rightarrow$ η διηλεκτρική σταθερά του οξειδίου,

$\epsilon_{Si} \rightarrow$ η διηλεκτρική σταθερά του πυριτίου και

$N_{SUB} \rightarrow$ η συγκέντρωση φορέων του υποστρώματος.

A3. Η ανάγκη ελέγχου του V_T και της χρήσης μονωτικών πύλης υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς.

Ο έλεγχος του δυναμικού κατωφλίου, V_T , είναι ένα πολύ βασικό ζήτημα στη μικροηλεκτρονική. Όταν δεν είναι επιθυμητή η δημιουργία στρωμάτων αναστροφής (του τύπου αγωγιμότητας) το δυναμικό κατωφλίου ρυθμίζεται ώστε να έχει μεγάλη τιμή. Ιδιαίτερα σε περιοχές ανάμεσα σε τρανζίστορ, η αναστροφή αποφεύγεται με διαχύσεις ή

εμφυτεύσεις προσμίξεων σε μεγάλη συγκέντρωση, ή με χρήση παχύτερου μονωτικού στρώματος .

Αντίθετα στα MOS τρανζίστορ η δημιουργία στρώματος αναστροφής είναι επιθυμητή. Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι για να ρυθμιστεί σε επιθυμητά επίπεδα το δυναμικό κατωφλίου. Ο ένας είναι η μεταβολή, με εμφύτευση ιόντων, της συγκέντρωσης προσμίξεων στη διεπιφάνεια πυριτίου μονωτή και ο άλλος είναι η χρήση μονωτικού υλικού διαφορετικού από το διοξείδιο του πυριτίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στην τελευταία περίπτωση είναι η χρήση του νιτριδίου του πυριτίου (Si_3N_4) ως μονωτικού υλικού. Το Si_3N_4 έχει διηλεκτρική σταθερά 7.5 ενώ το SiO_2 3.9, γεγονός που σημαίνει ότι αν για το ίδιο πάχος μονωτικού υλικού χρησιμοποιηθεί το νιτρίδιο αντί του διοξειδίου του πυριτίου, το στρώμα που θα προκύψει θα αντιστοιχεί σε λεπτότερο στρώμα διοξειδίου του πυριτίου. Η τάση για περιορισμό των διαστάσεων στη μικροηλεκτρονική έχει οδηγήσει στην αναζήτηση διηλεκτρικών πύλης με υψηλή διηλεκτρική σταθερά.

Το διοξείδιο του πυριτίου έχει χρησιμοποιηθεί ως διηλεκτρικό πύλης εδώ και πολλές δεκαετίες. Καθώς όμως τα τρανζίστορ ολοένα συρρικνώνονται σε μέγεθος, το πάχος του διοξειδίου του πυριτίου που χρησιμοποιείται ως διηλεκτρικό πύλης ολοένα μικραίνει με στόχο την αύξηση της χωρητικότητας πύλης (gate capacitance) και τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων. Καθώς όμως το πάχος του οξειδίου πέφτει κάτω από τα 2nm τα ρεύματα διαρροής λόγω φαινομένου tunneling αυξάνονται δραστικά υποβαθμίζοντας την αξιοπιστία της συσκευής και οδηγώντας σε ανεπιθύμητη κατανάλωση ενέργειας. Η αντικατάσταση του διοξειδίου του πυριτίου από μονωτικό υλικό με υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά καθιστά εφικτή την επίτευξη υψηλής χωρητικότητας πύλης χωρίς τα ανεπιθύμητα φαινόμενα ρευμάτων διαρροής.

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση που δίνει τη χωρητικότητα της πύλης (αγνοώντας κβαντομηχανικά φαινόμενα και φαινόμενα δημιουργίας περιοχών διακένωσης από το υπόβαθρο πυριτίου και την πύλη):

$$C = \frac{\epsilon_{OX}\epsilon_0 A}{t_{OX}} \quad (12)$$

όπου:

$A \rightarrow$ η επιφάνεια του πυκνωτή που σχηματίζεται και

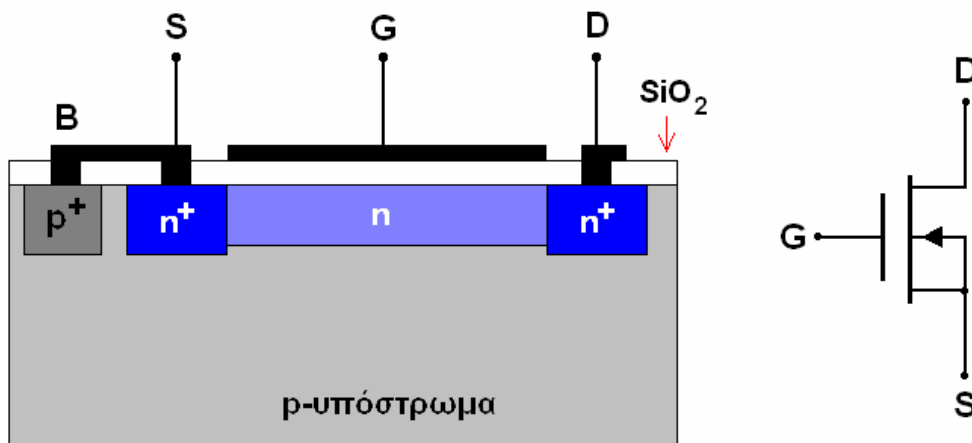
$\epsilon_0 \rightarrow$ η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού

γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αν αντί του στρώματος του διοξειδίου του πυριτίου πάχους κάτω του 1.5 nm, που παρουσιάζει προβλήματα λόγω ρευμάτων διαρροής, χρησιμοποιηθεί ένα διηλεκτρικό υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_{OX} συγκριτικά με αυτήν του SiO_2 πάχους 3nm τότε μπορεί να επιτευχθεί η ίδια χωρητικότητα χρησιμοποιώντας παχύτερο διηλεκτρικό πύλης και κατ επέκταση μειώνοντας σημαντικά τα ρεύματα διαρροής.

Ήδη από το έτος συγγραφής αυτού του κεφαλαίου (2007) και με χρονικό ορίζοντα το 2010, εταιρείες όπως οι Intel, IBM, NEC κ.ά έχουν στα πλάνα τους τη μετάβαση σε διηλεκτρικά πύλης υψηλότερης διηλεκτρικής σταθεράς από αυτήν του SiO_2 βασισμένα στο στοιχείο Χάφνιο (Hf), με πιθανότερα διηλεκτρικά τα : HfSiON , HfO_2 και HfSiO ενώ επίσης έχει παρουσιαστεί ενδιαφέρον και για οξειδία ή πυριτίδια του ζirkονίου.

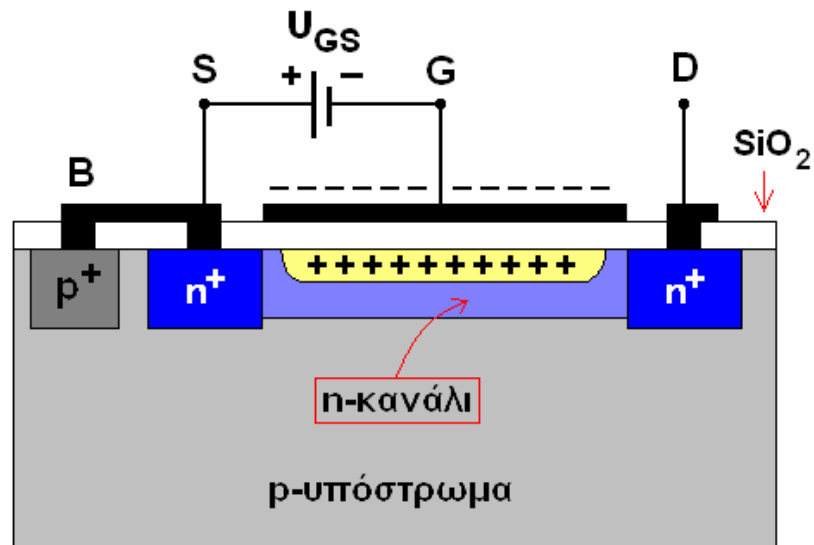
B. MOSFET διακένωσης (depletion MOSFET).

Το MOSFET διακένωσης ή αραιώσης έχει μια δομή που μοιάζει με αυτήν του MOSFET προσαύξεσης με τη διαφορά ότι στην περιοχή μεταξύ πηγής και απαγωγού προϋπάρχει κανάλι με τον ίδιο τύπο αγωγιμότητας (σχήμα 15).

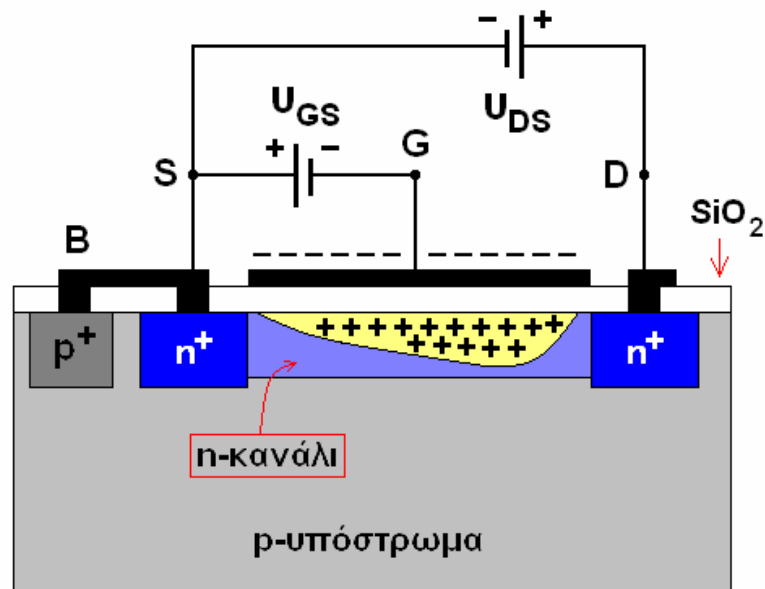


Σχήμα 15. MOSFET διακένωσης n-καναλιού (depletion NMOS) με το σύμβολό του.

Αν στην πύλη εφαρμοστεί ένα αρνητικό δυναμικό, όπως εικονίζεται στο σχήμα 16, τότε αυτό επάγει θετικά φορτία στο κανάλι. Τα θετικά αυτά επαγόμενα φορτία επανασυντίθενται με τους φορείς πλειονότητας του n-καναλιού (ηλεκτρόνια) δημιουργώντας έτσι μια περιοχή εκκένωσης φορέων πλειονότητας. Αν η τάση πύλης γίνει περισσότερο αρνητική, η περιοχή διακένωσης (σχήμα 16) θα διευρυνθεί και το διαθέσιμο n-τύπου κανάλι θα στενέψει ακόμη περισσότερο μέχρι να φτάσει τελικά σε μια τιμή κατωφλίου $V_T < 0$ όπου το κανάλι εκκενώνεται ολοκληρωτικά από φορείς πλειονότητας.



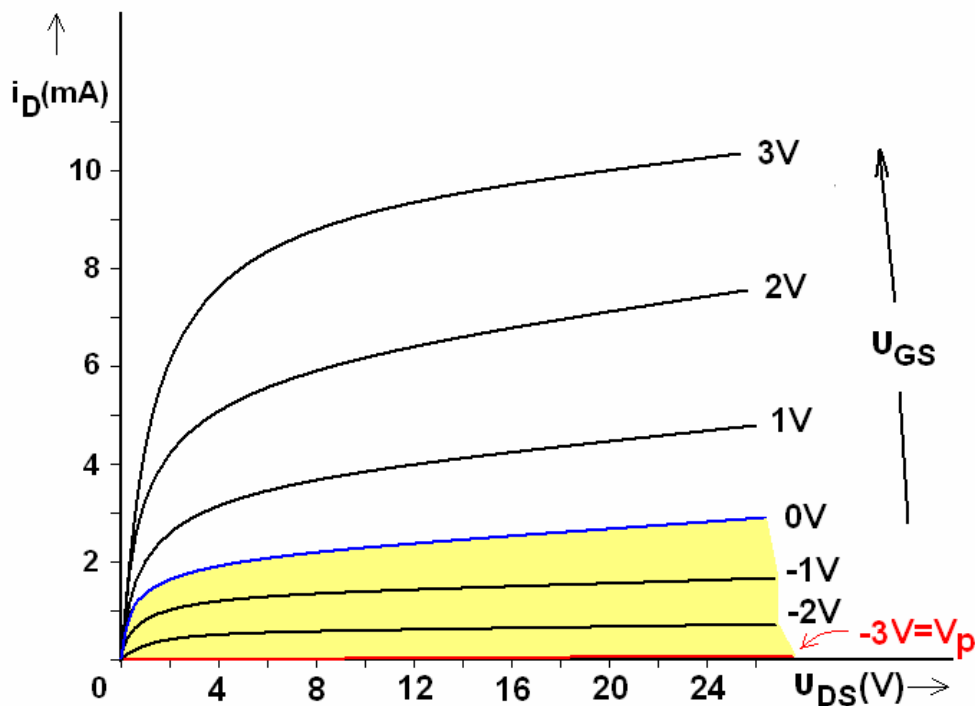
Σχήμα 16. MOSFET διακένωσης n-καναλιού (depletion NMOS). Ομοιόμορφος περιορισμός του εύρους του n-τύπου καναλιού υπό την επίδραση αρνητικής τάσης u_{GS} .



Σχήμα 17. MOSFET διακένωσης n-καναλιού (depletion NMOS). Ανομοιόμορφη διαμόρφωση του εύρους του n-τύπου καναλιού υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού u_{DS} μεταξύ απαγωγού και πηγής.

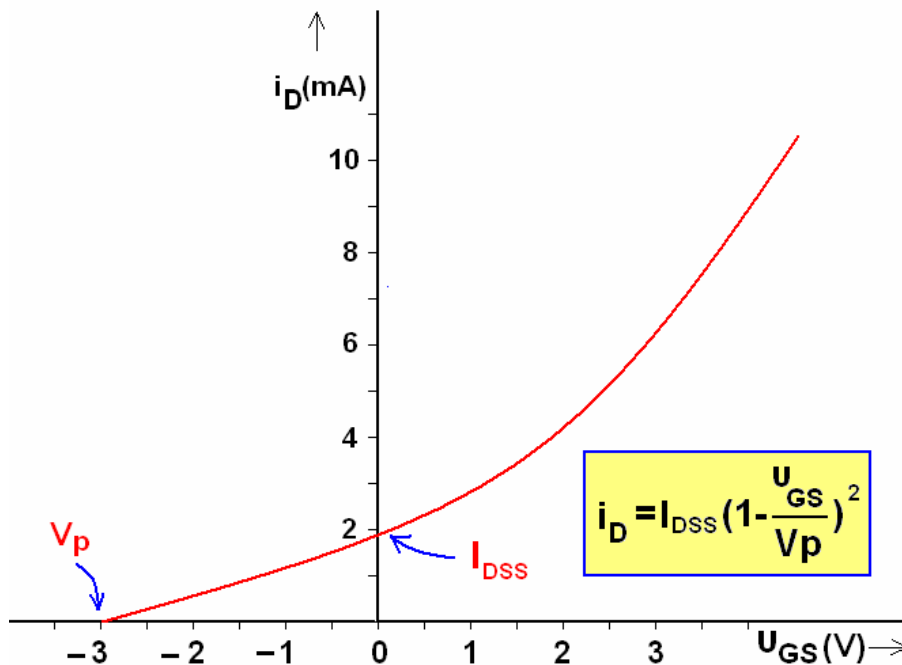
Αν παράλληλα με την αρνητική τάση u_{GS} , η οποία ας υποτεθεί πως δεν έχει γίνει αρνητικότερη από το κατώφλι (σχήμα 17) εφαρμοστεί και μια θετική τάση u_{DS} τότε παρατηρείται μια διεύρυνση της περιοχής εκκένωσης στην περιοχή του απαγωγού. Αυτή η ανομοιομορφία οφείλεται στην πτώση τάσης κατά μήκος του διαύλου λόγω του ρεύματος που τον διαρρέει. Αυτή η πτώση τάσης μεγαλώνει όσο κινούμαστε από την πηγή προς τον απαγωγό με αποτέλεσμα η διεύρυνση της περιοχής εκκένωσης να είναι πιο έντονη στην περιοχή του απαγωγού.

Το φαινόμενο αυτό της συρρίκνωσης του διαύλου είναι παρόμοιο με αυτό που περιγράφηκε στο κεφάλαιο των FET επαφής (JFET). Κατά συνέπεια η λειτουργία του MOSFET διακένωσης για $u_{GS} \leq 0$ είναι ταυτόσημη με αυτήν του JFET. (Περιοχή κίτρινου χρώματος στο σχήμα 18).



Σχήμα 18. Χαρακτηριστικές i_D - u_{DS} MOSFET διακένωσης. Σκιασμένη περιοχή: λειτουργία παρόμοια με JFET, μη σκιασμένη περιοχή: λειτουργία παρόμοια με MOSFET προσαύξησης.

Αν τώρα το δυναμικό u_{GS} γίνει θετικό, λόγω του γεγονότος ότι n-τύπου κανάλι υπάρχει εξ αρχής η περαιτέρω αύξηση του θετικού δυναμικού της πύλης θα επάγει (λόγω της χωρητικότητας πύλης-διαύλου) ολοένα και περισσότερα αρνητικά φορτία μέσα στο κανάλι αυξάνοντας την αγωγιμότητά του. Κατά συνέπεια, για θετικές τιμές της u_{GS} το τρανζίστορ συμπεριφέρεται όπως ένα τρανζίστορ προσαύξησης. Η χαρακτηριστική μεταφοράς του MOSFET διακένωσης (σχήμα 19) είναι παρόμοια με αυτήν του JFET.



Σχήμα 19. Χαρακτηριστική μεταφοράς MOSFET διακένωσης.

Επίσης, από το σχήμα 18 φαίνεται πως η αγωγιμότητα του MOSFET διακένωσης μπορεί να είναι είτε ωμική είτε κορεσμένη. Οι εξισώσεις 6 και 7 που δίνουν τη μορφή του ρεύματος στις δύο αυτές περιοχές (μη κορεσμένης και κορεσμένης αντίστοιχα) αγωγιμότητας για την περίπτωση του MOSFET προσαύξησης ισχύουν και για το MOSFET διακένωσης με τη διαφορά ότι $V_T < 0$.